

УДК 691.332.5

**В.А. Шаманов, В.А. Голубев, В.А. Харитонов,
С.В. Леонтьев, А.Д. Курзанов**

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ФАКТОРОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ГАЗОБЕТОНА АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

Рассмотрена проблема выбора факторов управления технологическим процессом производства автоклавного газобетона. По итогам экспертной оценки установлено, что наилучшие результаты по повышению качества готового продукта будут достигнуты при управлении процессом дозирования компонентов автоклавного газобетона. Дано обоснование выбору факторов управления качеством автоклавного газобетона на стадии дозирования, в числе которых соотношения n , $C_{св}$ и содержание активного кремнезема (SiO_2) в песке.

Ключевые слова: автоклавный газобетон, брак, человеческий фактор, стабильность, сырьевые компоненты, факторы, управление.

**V.A. Shamanov, V.A. Golubev, V.A. Kharitonov,
S.V. Leont'ev, A.D. Kurzanov**

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

RATIONALE FOR SELECTION FACTORS OF AAC QUALITY MANAGEMENT

In article the problem of a choice of factors of management of technological process of production of an autoclave aerated concrete by criterion of quality is considered. By results of an expert assessment it is established that the best results on improvement of quality of a ready-made product will be reached at management of process of dispensing of components of an autoclave gas concrete. Justification of a choice of factors of quality management of an autoclave gas concrete at a dispensing stage, among which ratios of n , C_b and the content of active silicon dioxide (SiO_2) in sand is given.

Keywords: AAC, spoilage, human factor, stability, input products, factors, management.

Введение

Процесс производства изделий из автоклавного газобетона (АГБ) следует рассматривать как сложную иерархическую систему, состояние которой зависит от множества факторов. Для управления такими слож-

ными системами необходимо использовать методы математического моделирования, что позволит систематизировать знания о производственных параметрах, а также повысит эффективность решений, принимаемых персоналом на различных постах и стадиях технологического процесса.

Известно [1, 2], что основной проблемой при разработке математических моделей производства изделий из автоклавного газобетона является трудоемкость (а в ряде случаев невозможность) выявления различного рода связей между входными координатами, управляющими воздействиями и конечным результатом (качеством готового продукта). Это обусловлено нехваткой и разнородностью информации о текущем состоянии технологического процесса, поскольку отсутствует возможность измерения некоторых параметров полуфабриката на промежуточных стадиях процесса.

По мнению многих авторов, моделирование многостадийного процесса, осложненного рядом взаимовлияющих координат, может существенно облегчиться, если рассматривать его как совокупность простых звеньев, каждое из которых характеризует элементарное влияние различных координат на качество готового продукта [3–5]. В таком случае входные координаты на отдельной стадии будут формировать вектор показателей промежуточного качества, который, в свою очередь, будет являться набором входных координат для следующей стадии (рис. 1). При такой интерпретации задачи моделирования основной проблемой является определение наиболее значимых управляющих факторов.

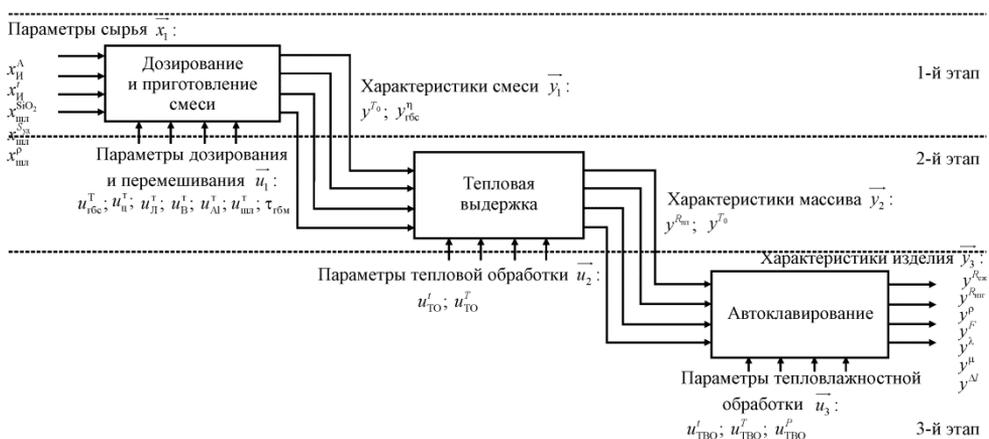


Рис. 1. Взаимное влияние параметров на различных стадиях технологического процесса производства автоклавного газобетона

1. Выбор стадии производства автоклавного газобетона для управления качеством готового продукта

В результате анализа технологического процесса производства автоклавного газобетона были выделены три основные стадии: дозирование компонентов и их перемешивание, предварительная выдержка массива до набора требуемой пластической прочности, автоклавная обработка полуфабриката для получения готового продукта.

На стадии дозирования компонентов и их перемешивания осуществляется приготовление ячеистобетонной смеси требуемой однородности и с заданной температурой ($u_{г\text{бс}}^T$). К входным параметрам данной стадии можно отнести все характеристики качества исходного сырья, параметры перемешивания. Однако с учетом особенностей сырьевой базы Пермского края выделим лишь наиболее важные из них, а именно: активность извести ($x_{\text{И}}^A$), температура ее гашения ($x_{\text{И}}^T$), время гашения ($x_{\text{И}}^t$), содержание активного кремнезема в песчаном шламе ($x_{\text{шл}}^{\text{SiO}_2}$), тонкость помола песчаного шлама ($x_{\text{шл}}^{S_{\text{ул}}}$), плотность песчаного шлама ($x_{\text{шл}}^p$). В качестве управляющих воздействий будем рассматривать расходы основных компонентов ячеистобетонной смеси: портландцемента (Ц, $u_{\text{Ц}}^T$), извести (И, $u_{\text{И}}^T$), кремнеземистого компонента (песка) (П, $u_{\text{П}}^T$), воды (В, $u_{\text{В}}^T$), алюминиевой пудры (Al, u_{Al}^T). При этом стоит учитывать, что непосредственно в технологической линии кремнеземистый компонент (кварцевый песок) применяется в виде песчаного шлама (Шл, $u_{\text{шл}}^T$) – водной суспензии тонкомолотого кварцевого песка. На данной стадии управляющими воздействиями также будут являться скорость ($v_{г\text{бм}}$) и время ($\tau_{г\text{бм}}$) перемешивания ячеистобетонной смеси.

На стадии предварительной выдержки массива осуществляется изотермический прогрев сырца для стабилизации поровой структуры массива, достижения химического равновесия в условиях медленного охлаждения массива ($x_{г\text{бс}}^T \rightarrow y^{T_0}$) и набора им (массивом) требуемой пластической прочности ($y^{R_{\text{пл}}}$). Вектор входных параметров в данном случае будет складываться из следующих координат: температуры ячеистобетонной смеси ($x_{г\text{бс}}^T$), вязкости свежеприготовленной ячеисто-

бетонной смеси ($\eta_{\text{гбс}}$). Управляющими воздействиями на стадии предварительной выдержки будут являться время ($u_{\text{ТО}}^t$) и температура ($u_{\text{ТО}}^T$) тепловой обработки.

На стадии автоклавной обработки полуфабрикат-сырец подвергается запариванию при высокой температуре ($u_{\text{ТВО}}^T$) и избыточном давлении ($u_{\text{ТВО}}^P$) в течение определенного времени ($u_{\text{ТВО}}^t$). В результате автоклавирования полуфабрикат превращается в готовый продукт с комплексом качественных характеристик: прочностью при сжатии ($y^{R_{\text{сж}}}$), прочностью на растяжение при изгибе ($y^{R_{\text{изг}}}$), средней плотностью ($y^{P_{\text{сп}}}$), морозостойкостью (y^F), теплопроводностью (y^λ), паропроницаемостью (y^μ), усадкой ($y^{\Delta l}$) [6].

С целью уменьшения размерности и сложности математической модели производственного процесса предлагается выбрать наиболее значимые факторы изменения качества готового продукта. Получению более точных и достоверных сведений о влиянии различных управлений на вектор характеристик готового продукта будет способствовать привлечение экспертной информации, которая позволит сформировать причинно-следственные связи между изменяемыми величинами и выходными координатами [7].

Рассмотрим задачу выбора наилучшего решения из заданного множества альтернатив. При этом решение будет приниматься в рамках небольшой группы экспертов. Под альтернативой в данном случае будем понимать ступень управления технологическим процессом производства (ТПП) автоклавного газобетона. Поскольку процесс производства АГБ является многостадийным, а качество самого изделия складывается из многих критериев, то за основу возьмем модель коллективного выбора на основе комплексного оценивания альтернатив в виде линейной свертки [8].

Примем, что количество допустимых альтернатив равно n , число экспертов – m . Количество частных показателей качества, характеризующих каждую из возможных альтернатив, равно r . При построении модели численное значение k -го частного показателя для i -й альтернативы обозначим J_k^i , $i = 1, \dots, n$; $k = 1, \dots, r$, а значимость k -го частного показателя качества альтернативы обозначим как v_k .

Численно все значения предпочтений и значимости задаются в диапазоне от 0 до 1, начиная с наихудшего (наименее значимого) и заканчивая наилучшим (наиболее значимым). Будем считать, что наилучшее решение для некоторого k -го частного показателя достигается при его максимальном значении.

В нашем случае, когда квалификация эксперта не связана с экономическим смыслом частных показателей качества альтернативы, функция предпочтительности может быть записана следующим образом:

$$pr(x_i) = \sum_{k=1}^r v_k \cdot J_k^i, \quad i=1, \dots, n. \quad (1)$$

В качестве наилучшей альтернативы выбирается та, для которой выполняется условие

$$pr(x_i) > pr(x_l), \quad \forall i, l=1, \dots, n; \quad i \neq l. \quad (2)$$

Другими словами, лучшей считается та альтернатива, для которой значение функции предпочтительности принимает максимальное значение.

Для принятия коллективного решения были сформированы опросные листы, содержащие мнение десяти экспертов [9]. В первую очередь экспертам предлагалось дискретно оценить по шкале от 1 до 4 важность отдельных показателей готового продукта (прочность при сжатии, среднюю плотность, морозостойкость, теплопроводность и отпусную влажность), где 1 – не важен, 2 – важен незначительно, 3 – важен значительно, 4 – существенно важен.

Необходимо отметить, что приведенная оценка важности (v_k) рассчитывается как отношение k -го показателя важности к сумме всех показателей важности:

$$\bar{v}_k = \frac{v_k}{\sum v_k}. \quad (3)$$

Результаты экспертных оценок важности отдельных показателей качества готового продукта представлены в табл. 1.

Кроме того, перед экспертами был поставлен вопрос о том, какое влияние оказывает набор управлений на различных этапах технологического процесса на улучшение отдельных характеристик готового продукта (табл. 2).

Таблица 1

Важность отдельных показателей качества готового продукта

№ п/п	Показатель качества	Важность, v_k	Приведенная оценка важности, \bar{v}_k
1	Прочность при сжатии, $R_{сж}$, МПа	3,0	0,21
2	Средняя плотность, $\rho_{ср}$, кг/м ³	3,7	0,25
3	Морозостойкость, F , циклы	3,2	0,22
4	Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(м·°С)	2,0	0,14
5	Отпускная влажность готового изделия, W_m , %	2,7	0,18

Таблица 2

Оценка предпочтительности альтернатив при управлении ТПП АГБ

Код	Наименование альтернативы	Значения оценки, J_k^i					$pr(x_i)$
		R	ρ	F	λ	W	
x_1	Дозировка	3,9	3,8	3,7	3,2	3,1	0,42
x_2	Тепловая обработка	3,8	3,0	1,3	2,9	2,1	0,31
x_3	Автоклавирование	3,7	1,3	1,3	3,0	2,9	0,27

По результатам оценки предпочтительности альтернатив можно сделать вывод, что $x_1 \gg x_2 > x_3$, т.е. наилучшие результаты по повышению качества готового продукта будут достигнуты при управлении процессом дозирования компонентов автоклавного газобетона.

2. Выбор факторов управления на стадии дозирования компонентов автоклавного газобетона

Как известно [10], в состав газобетона автоклавного твердения входят известь, портландцемент, кремнеземистый компонент, газообразователь и вода. Соотношение указанных компонентов рассчитывается согласно СН 277-80, где в качестве необходимых и достаточных данных для расчета количества материала выступают соотношения n (доля цемента в известково-цементном вяжущем), $C_{св}$ (отношение массы кремнеземистого компонента к известково-цементному вяжущему), $В/Т$ (отношение количества воды к массе сухих компонентов), $A_{и}$ (активность извести), D (марка газобетона по средней плотности), а также другие справочные характеристики.

Результаты ранее выполненных авторами исследований [11] показали, что на качество газобетона автоклавного твердения оказывает влияние также активность кремнеземистого компонента, вызванная его

нестабильностью во времени. Это подтверждается сравнением результатов оценки стабильности различных сырьевых материалов по отдельным показателям качества с помощью контрольных карт изменения входных и выходных данных (рис. 2).

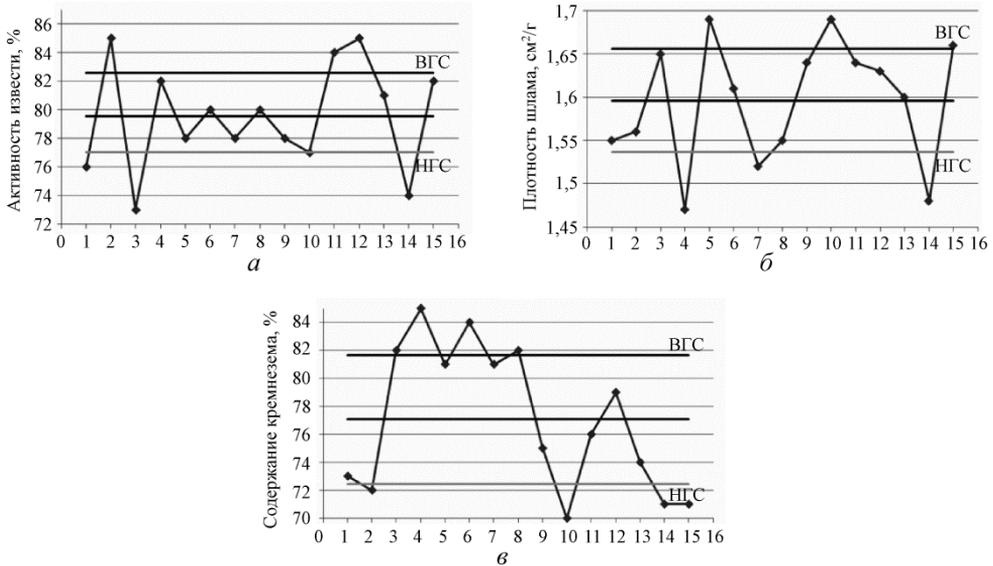


Рис. 2. Карта статистического контроля качества сырьевых компонентов по показателю: *а* – активности извести; *б* – плотности песчаного шлама; *в* – содержания активного кремнезема в песке

График контроля делится на четыре зоны, при этом на график наносятся три линии: линия среднего уровня оцениваемой величины, нижняя (НГC) и верхняя (VГC) границы стабильности.

Уровень стабильности качества представлен линиями вариативности, которые можно выразить следующими уравнениями:

$$Y_{VГC} = Y_T(1 + V_T), \quad (4)$$

$$Y_{НГC} = Y_T(1 - V_T), \quad (5)$$

где $Y_{VГC}$ – верхняя граница стабильности; $Y_{НГC}$ – нижняя граница стабильности; Y_T – среднее значение оцениваемой величины; V_T – значение коэффициента вариации, рассчитываемое по формуле

$$V_T = \frac{S_T}{Y_T} \quad (6)$$

где S_T – среднеквадратичное отклонение оцениваемой величины.

Анализируя приведенные данные, можно отметить относительное постоянство характеристики активности извести. Однако по другим характеристикам качества сырья: плотности песчаного шлама и содержанию кремнезема в песке, – такой стабильности не наблюдается.

Заключение

Таким образом, по результатам оценки предпочтительности альтернатив можно сделать вывод, что наилучшие результаты по повышению качества автоклавного газобетона будут достигнуты при управлении процессом дозирования компонентов автоклавного газобетона. При этом в качестве факторов управления в первую очередь следует рассматривать соотношения n (доля цемента в известково-цементном вяжущем), $C_{св}$ (отношение массы кремнеземистого компонента к известково-цементному вяжущему), а также содержание активного кремнезема (SiO_2) в песке.

Список литературы

1. Гитман М.Б., Столбов В.Ю., Федосеев С.А. Математическая модель управления качеством продукции // Качество в обработке материалов. – 2014. – № 1. – С. 21–26
2. Зиновкин В.В., Кулинич Э.М. Многопараметрическая система автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – № 3/3 (39). – С. 38–43.
3. Филин В.А. Изменение влажности полотна в процессе производства гофрированного картона // Совершенствование технологии тарного картона и картонной тары: сб. тр. – М.: Изд-во ВНИПИЭИлеспром, 1986. – С. 26–34.
4. Толмачев С.Н., Жадан А.И. Управление качеством дорожного бетона на основе информационных технологий // Вестник Харьков. нац. авт.-дорож. ун-та: сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины. – Харьков, 2005. – Вып. 29. – С. 295–298.
5. Морозов Ю.Л. Система управления характеристиками товарного бетона на основе информационных технологий // Строительные материалы. – 2001. – № 8. – С. 20–21.
6. Концепция автоматизации и управления технологическим процессом производства газобетона автоклавного твердения / В.А. Шаманов,

С.В. Леонтьев, В.А. Голубев, В.А. Харитонов // Науч.-техн. вестник Поволжья. – 2015. – № 2. – С. 225–227.

7. Отношение объективного и субъективного в моделях принятия решений / А.А. Белых, Ю.Г. Горлов, Н.П. Калинин, В.А. Харитонов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. сельскохозяй. акад., 2008. – 230 с.

8. Алгоритм принятия коллективных решений в рамках ситуационного центра промышленного предприятия / А.В. Вожаков, М.Б. Гитман, В.Ю. Столбов, А.С. Елисеев // Прикладная математика и вопросы управления. – 2015. – № 2. – С. 63–74.

9. Интеллектуальные технологии обоснования инновационных решений: монография / И.В. Елохова, В.И. Стаматин, А.А. Белых, Р.Ф. Шайдулин, А.О. Алексеев, М.В. Лыков, И.Р. Винокур, Е.В. Калюшина, К.А. Гуреев; под общ. ред. В.А. Харитонова. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 342 с.

10. Опыт получения автоклавного теплоизоляционного газобетона / С.В. Леонтьев, В.А. Голубев, К.А. Сарайкина, В.А. Шаманов // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер.: Строительство и архитектура. – 2014. – Т. 14, № 1. – С. 46–49.

11. Современное состояние и перспективы оптимизации технологического процесса производства автоклавного газобетона [Электронный ресурс] / В.А. Шаманов, С.В. Леонтьев, А.Д. Курзанов, В.А. Голубев, В.А. Харитонов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 5 (часть 3). – С. 558–563. – URL: <http://www.rae.ru/fs/pdf/2015/5-3/38300.pdf> свободный (дата обращения: 1.12.2015).

References

1. Gitman M.B., Stolbov V.Iu., Fedoseev S.A. Matematicheskaja model' upravlenija kachestvom produkcii [Mathematical model of product quality control]. *Kachestvo v obrabotke materialov*, 2014, no. 1, pp. 21-26.

2. Zinovkin V.V., Kulinich E.M. Mnogoparametricheskaja sistema avtomatizirovannogo upravlenija tekhnologicheskim protsessom prigotovlenija gazobetona [Multiple parameter system of automated management of technological process of preparation of a gas concrete]. *Skhidno-Evropskij zhurnal peredovikh tekhnologii*, 2009, no. 3/3, iss. 39, pp. 38-43.

3. Filin V.A. Izmenenie vlazhnosti polotna v protsesse proizvodstva gofirovannogo kartona [Change of humidity of a cloth in the course of production of corrugated fibreboard]. *Sovershenstvovanie tekhnologii tarnogo kartona i kartonnoi tary*. Moscow, 1986, pp. 26-34.

4. Tolmachev S.N., Zhadan A.I. Upravlenie kachestvom dorozhnogo betona na osnove informatsionnykh tekhnologii [Quality management of road concrete on the basis of information technologies]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2005, vol. 29, pp. 295-298.

5. Morozov Iu.L. Sistema upravleniia kharakteristikami tovarnogo betona na osnove informatsionnykh tekhnologii [Control system of characteristics of commodity concrete on the basis of information technologies]. *Stroitel'nye materialy*, 2001, no. 8. pp. 20-21.

6. Shamanov V.A., Leont'ev S.V., Golubev V.A., Kharitonov V.A. Kontsepsiia avtomatizatsii i upravleniia tekhnologicheskim protsessom proizvodstva gazobetona avtoklavnogo tverdeniia [The concept of AAC's production control]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2015, no. 2, pp. 225-227.

7. Belykh A.A., Gorlov Iu.G., Kalinin N.P., Kharitonov V.A. Otnoshenie ob"ektivnogo i sub"ektivnogo v modeliakh priniatiia reshenii [Relation of objective and subjective decision-making in models]. Perm, 2008. 230 p.

8. Vozhakov A.V., Gitman M.B., Stolbov V.Iu., Eliseev A.S. Algoritm priniatiia kollektivnykh reshenii v ramkakh situatsionnogo tsentra promyshlennogo predpriiatiia [Collective decision making algorithm in situation center of industrial company]. *Prikladnaia matematika i voprosy upravleniia*, 2015, no. 2, pp. 63-74.

9. Elokhova I.V., Stamatina V.I., Belykh A.A., Shaidulin R.F., Alekseev A.O., Lykov M.V., Vinokur I.R., Kaloshina E.V., Gureev K.A. Intellekturnye tekhnologii obosnovaniia innovatsionnykh reshenii [Intellectual technologies of justification of innovative solutions]. Ed. by V.A. Kharitonov. Perm, 2010. 342 p.

10. Leont'ev S.V., Golubev V.A., Saraikina K.A., Shamanov V.A. Opyt polucheniia avtoklavnogo teploizoliatsionnogo gazobetona [Development of heat-insulating autoclaved aerated concrete]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, vol. 14, no. 1, pp. 46-49.

11. Shamanov V.A., Leont'ev S.V., Kurzanov A.D., Golubev V.A., Kharitonov V.A. Sovremennoe sostoianie i perspektivy optimizatsii tekhnologicheskogo protsessa proizvodstva avtoklavnogo gazobetona [Current state and prospects of process optimization production autoclaved aer-

ated concrete]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no. 5, part 3, pp. 558-563, available at: <http://www.rae.ru/fs/pdf/2015/5-3/38300.pdf> (accessed 1 December 2015).

Получено 24.12.2015

Об авторах

Шаманов Виталий Альбертович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: shamanov@cems.pstu.ru).

Голубев Виктор Алексеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение», декан строительного факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: golubev_va@cems.pstu.ru).

Харитонов Валерий Алексеевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, заведующий кафедрой «Строительный инжиниринг и материаловедение», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: nedstf@pstu.ru).

Леонтьев Степан Васильевич (Пермь, Россия) – аспирант, ассистент кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: leontyev@cems.pstu.ru).

Курзанов Александр Дмитриевич (Пермь, Россия) – аспирант, ассистент кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kurzanov@cems.pstu.ru).

About the authors

Vitalii A. Shamanov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Construction Engineering and Material Sciences, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: shamanov@cems.pstu.ru).

Viktor A. Golubev (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical sciences, Associate Professor, Department of Construction Engineering and Material Sciences, Acting Dean of Civil Engineering Faculty, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: golubev_va@cems.pstu.ru).

Valerii A. Kharitonov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, Department of Construction Engineering and Material Sciences, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: cems@pstu.ru).

Stepan V. Leont'ev (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Assistant of Department of Construction Engineering and Material Sciences, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: leontyev@cems.pstu.ru).

Aleksandr D. Kurzanov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Assistant of Department of Construction Engineering and Material Sciences, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: kurzanov@cems.pstu.ru).